

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05373

研究課題名(和文)鉄欠乏に应答した根-葉-根間の長距離シグナル伝達機構解明

研究課題名(英文) Analysis of root-to-shoot-to-root communication pathway in response to iron deficiency

研究代表者

田畑 亮 (Tabata, Ryo)

名古屋大学・生命農学研究科・特任講師

研究者番号：30712294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：植物は、土壤中の根の一部が局所的な鉄欠乏におちいったとき、周りに十分な鉄が存在する根にその情報を伝え、鉄吸収を相補的に促進させることで、個体全体の鉄含量を一定に保つ巧みなシステムを持つ。しかしながら、その器官間コミュニケーションを制御する分子実態はこれまで明らかにされていなかった。本研究では、不均一な土壌環境を模倣したSplit-root培養法を用いた時系列トランスクリプトーム解析から、葉から根へ移動して鉄吸収を活性化する器官間移動性の候補分子としてIRON MAN (IMA/FEP)を同定した。接木実験から、IMAは葉で発現誘導されることで、根の鉄吸収を促進していることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地に根を張り自ら動くことのできない植物は、脳や神経を持たない代わりに、体中に張り巡らされた維管束を利用し、根と葉のコミュニケーションによって様々な環境ストレスに柔軟に適応している。しかし、その詳細なメカニズムは明らかになっていなかった。本研究では、植物はIMA鉄結合ペプチド分子を介した器官間シグナル伝達機構により、鉄欠乏ストレスに应答して鉄吸収量を調節して個体の恒常性を維持している事を明らかにすることができた。今後は、IMAペプチドの機能改変、その利用によって、鉄などミネラル豊富な植物栽培制御への技術開発が期待される。

研究成果の概要(英文)：Plants have a systemic mechanism by which local iron (Fe) starvation on one side of the root leads to a compensatory and increased Fe uptake on the other root exposed to the Fe-rich patch. However, the molecular mechanisms that control this organ-to-organ communication have not been clarified. In this study, we identified IRON MAN (IMA/FEP) as a candidate molecule that moves from leaf to root and activates Fe uptake as a mobile signaling molecule based on time-series transcriptome analysis using a split-root culture that mimics a heterogeneous soil environment. Grafting experiments also supported that IMA acts as a shoot-derived descending signal that upregulates Fe transporter genes in the roots.

研究分野：植物栄養学

キーワード：植物 シロイヌナズナ 鉄欠乏应答 器官間シグナル伝達 環境ストレス应答

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまで無機栄養欠乏応答の研究において、シロイヌナズナやイネを用いた遺伝学的なアプローチ等により、それぞれの無機元素に対する輸送体や代謝遺伝子、あるいはそれらの因子の発現量を制御する情報伝達因子群が多数同定されてきた。しかし、これらの変異体解析から解明された分子メカニズムは、その殆どが根における局所的な栄養取り込み制御に関するものであった。また、多くの実験は、均一な無機栄養濃度条件での培地(根圏環境)下で実施されたものであり、植物が本来保持している不均一な土壤環境へ適応するためのシステムを捉え切れていなかった。つまり、植物が外環境変化に応答して個体全体の恒常性維持するために持つ「地下部地上部間の情報交換」システムや、それらの仕組みを使った「土壤栄養環境の不均一性への適応戦略」は理解が限定的であった。

### 2. 研究の目的

植物は様々な土壤環境ストレスに順応するため、維管束系を利用した全身的な情報伝達機構を発達させてきた。しかしながら、これらの植物の長距離シグナルを担う分子はほとんど明らかになっていなかった。研究代表者はこれまで、土壤中の不均一に存在する硝酸イオンを効率良く吸収するための“根-葉-根”間の長距離シグナル伝達がペプチドホルモン CEP を介して行われる事を明らかにしてきた(Tabata et al., Science 2014)。そこで本研究では、植物の土壤中の鉄欠乏に応答した根-葉-根間の長距離シグナルを担う移動性分子の単離や、その制御機構の解析によって、植物特有の長距離シグナル伝達機構の解明を目的とする。本研究によって、窒素と鉄欠乏に応答した長距離シグナルの普遍性と多様性を解くことができ、他の無機栄養の長距離シグナル制御機構解明に貢献できると期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究代表者による窒素欠乏応答における結果を基盤として、植物が持つ不均一な土壤環境への適応システム理解へ迫るため、土壤中の不均一栄養環境を模倣した Split-root 培養法を利用したトランスクリプトーム解析を実施する。これによって、鉄欠乏に応答した移動性シグナル分子および制御因子を単離し、根-葉-根間の長距離シグナル伝達機構を明らかにする。

長距離シグナル伝達に重要な候補因子が単離されたら、破壊株および過剰発現体を用いた Split-root 鉄欠乏応答の検証や、候補因子の植物体内における発現部位を明らかにする。また、接ぎ木実験によって、その移動性を証明する。そして、本研究で新たに同定された因子と、鉄関連の既知の因子との関係性について遺伝学的、分子生物学的アプローチを併用して解析する。これらの解析を通じて、鉄欠乏に応答した根-葉-根間の長距離シグナルの統合的理解を進める。得られた結果から、窒素欠乏における長距離シグナルと比較を行い、普遍性や多様性について考察する。

### 4. 研究成果

シロイヌナズナを用いた Split-root 鉄欠乏処理実験による時系列 RNA-seq 解析から、一部の根が鉄欠乏条件下に晒されると、他方の根において鉄イオントランスポーター(*IRT1*)や還元酵素(*FRO2*)、および、鉄吸収を促進するクマリン合成に関する遺伝子(*S8H*, *CYP82C4*)の発現量が相補的に増加した。また、葉から根へ移動して鉄吸収を活性化する器官間移動性の候補分子として「鉄結合タンパク質(IRON MAN; IMA/FEP)」を同定した。IMA 多重変異体では、Split-root 鉄欠乏処理時において、*IRT1* の相補的な発現量上昇は全く起こらなかった。また、

シロイヌナズナ接ぎ木実験の結果から、*IMA* は地上部で発現誘導されることで、地下部（根）の正常な発達や *IRT1* および、シデロフォア合成（クマリン合成）系の遺伝子発現を制御していることが明らかになった。つまり、*IMA* が鉄欠乏に応答した長距離シグナリングを制御する、葉から根への器官間を移動して鉄吸収やクマリン合成を活性化するシグナル分子である可能性が強く示唆された（Tabata et al., *Plant Cell Physiology* 2022）。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Notaguchi, M., Kurotani, K., Sato, Y., Tabata, R., Kawakatsu, Y., Okayasu, K., Sawai, Y., Okada, R., Asahina, M., Ichihashi, Y., Shirasu, K., Suzuki, T., Niwa, M., Higashiyama, T	4. 巻 369
2. 論文標題 Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by $\alpha$ -1,4-glucanases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 698-702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abc3710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsutui, H., Yanagisawa, N., Kawakatsu, Y., Ikematsu, S., Sawai, Y., Tabata, R., Arata, H., Higashiyama, T., Notaguchi, M	4. 巻 7
2. 論文標題 Micrografting device for testing environmental conditions for grafting and systemic signalling in Arabidopsis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant J.	6. 最初と最後の頁 918-929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/tpj.14768	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shikanai, Y., Yoshida, R., Hirano, T., Enomoto, Y., Li, B., Asada, M., Yamagami, M., Yamaguchi, K., Shigenobu, S., Tabata, R., Sawa, S., Okada, H., Ohya, Y., Kamiya, T., Fujiwara, T	4. 巻 182
2. 論文標題 Callose synthesis suppresses cell death induced by low-calcium conditions in Arabidopsis leaves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Physiol.	6. 最初と最後の頁 2199-2212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.19.00784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shikanai Yusuke, Yoshida Ryosuke, Hirano Tomoko, Enomoto Yusuke, Li Baohai, Asada Mayu, Yamagami Mutsumi, Yamaguchi Katsushi, Shigenobu Shuji, Tabata Ryo, Sawa Shinichiro, Okada Hiroki, Ohya Yoshikazu, Kamiya Takehiro, Fujiwara Toru	4. 巻 182
2. 論文標題 Callose Synthesis Suppresses Cell Death Induced by Low-Calcium Conditions in Leaves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 2199 ~ 2212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.19.00784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirakawa Y, Uchida N, Yamaguchi YL, Tabata R, Ishida S, Ishizaki K, Nishihama R, Kohchi T, Sawa S, Bowman JL	4. 巻 7
2. 論文標題 Control of proliferation in the haploid meristem by CLE peptide signaling in <i>Marchantia polymorpha</i> .	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLoS Genet.	6. 最初と最後の頁 e1007997
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pgen.1007997.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Misato Kawai, Ryo Tabata, Miwa Ohashi, Haruno Honda, Takehiro Kamiya, Mikiko Kojima, Yumiko Takebayashi, Shunsuke Oishi, Satoru Okamoto, Takushi Hachiya, Hitoshi Sakakibara	4. 巻 188
2. 論文標題 Regulation of ammonium acquisition and use in <i>Oryza longistaminata</i> ramets under nitrogen source heterogeneity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 2364-2376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/plphys/kiac025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazunori Shimizu, Yaichi Kawakatsu, Ken-ichi Kurotani, Masahiro Kikkawa, Ryo Tabata, Daisuke Kurihara, Hiroyuki Honda, Michitaka Notaguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of microfluidic chip for entrapping tobacco BY-2 cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0266982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Tabata, Takehiro Kamiya, Shunpei Imoto, Hana Tamura, Michika Tabata, Tasuku Hirayama, Hironaka Tsukagoshi, Keitaro Tanoi, Takamasa Suzuki, Takushi Hachiya, Hitoshi Sakakibara	4. 巻 63
2. 論文標題 Systemic Regulation of Iron Acquisition by Arabidopsis in Environments with Heterogeneous Iron Distributions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plant Cell Physiology	6. 最初と最後の頁 842-854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcac049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田畑亮
2. 発表標題 生命金属「鉄」動態を制御する植物の器官間シグナル伝達機構
3. 学会等名 第62回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田畑亮
2. 発表標題 根と葉の間の長距離シグナルによる栄養吸収制御
3. 学会等名 第5回 植物の栄養研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田畑亮
2. 発表標題 Long-distance signaling in response to nitrogen and iron-starvation
3. 学会等名 19th International Symposium On Iron Nutrition and Interactions in Plants（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田畑 亮, 生田 久美子, 田村 花, 神谷 岳洋, 田野井 慶太郎, 松林 嘉克, 榊原 均
2. 発表標題 鉄欠乏に応答した長距離シグナル制御
3. 学会等名 第60回 日本植物生理学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田畑亮
2. 発表標題 植物の器官間シグナル伝達を介した鉄吸収制御
3. 学会等名 第255回遺伝子機能解析部門セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田畑亮
2. 発表標題 シロイヌナズナ器官間シグナリングを介した「鉄」吸収制御
3. 学会等名 第6回 植物の栄養研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田畑亮, 井本駿平, 田村花, 神谷岳洋, 木羽隆敏, 榊原均
2. 発表標題 シロイヌナズナにおける器官間シグナル伝達を介した鉄吸収制御
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度北海道大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chaokun Huang, Michitaka Notaguchi, Kenichi Kurotani, Yaichi Kawakatsu, Ryo Tabata
2. 発表標題 Regeneration of tracheary elements facilitate scion growth upon <i>N. benthamiana</i> interfamily grafting
3. 学会等名 第85回 日本植物学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒谷賢一, 田畑亮, 川勝弥一, 杉田亮平, 岡安浩次, 田野井慶太郎, 野田口理孝
2. 発表標題 接木後の組織修復におけるオートファジー誘導の発見
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chaokun Huang, Kenichi Kurotani, Ryo Tabata, Michitaka Notaguchi
2. 発表標題 Xylem formation enhances scion growth of Nicotiana interfamily grafting
3. 学会等名 第63回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 接木接着酵素タンパク質剤	発明者 野田口理孝, 黒谷賢一, 田畑亮, 川勝弥一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-042379	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関